

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Obor Dopravní stroje a manipulace s materiálem



Demonstrační pneumatický dopravník

Pneumatic Conveyor for Demonstration

Student:

Bc. Tomáš Valčík

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Robert Brázda, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Valčík**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 35 Dopravní stroje a manipulace s materiálem
Téma: **Demonstrační pneumatický dopravník**
Pneumatic Conveyor for Demonstration
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhnete a konstrukčně zpracujete demonstrační pneumatický dopravník pro dopravu a skladování airsoftových kuliček.

Parametry zadání:

Dopravní množství $V = 10$ litrů;
Doprava podtlakem i přetlakem;
Průměr airsoftových kuliček $d = 6$ mm;
Objemová tíha airsoftových kuliček $G = 6$ kN/m³;
Efektivní úhel vnitřního tření airsoftových kuliček $\varphi_e = 35^\circ$;
Součinitel smykového tření mezi airsoftovými kuličkami a plastem $\mu = 0,3$;
Další parametry volte dle požadavků z praxe.

Požadované výstupy:

- 1) Zpracujte rešerši na téma pneumatických dopravních systémů s důrazem na zdroje tlaku/podtlaku.
- 2) Vypracujte varianty řešení a zvolte optimální variantu.
- 3) Navrhnete pneumatický okruh - zdroj tlaku/podtlaku, filtry, dávkovač, dopravní potrubí, odlučovač.
- 4) Vytvořte sestavný výkres zvolené varianty.

Seznam doporučené odborné literatury:

Polák, J., Pavliska, J., Slíva, A.: Dopravní a manipulační zařízení I. Ostrava: ES VŠB-TU Ostrava, 2001. ISBN 80-248-0043-8.
Polák, J., Bailotti, K., Pavliska, J., Hrabovský, L.: Dopravní a manipulační zařízení II. Ostrava: ES VŠB-TU Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0493-X.
Polák, J., Slíva, A.: Dopravní a manipulační zařízení III. Ostrava: ES VŠB-TU Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0963-X.
Pavliska, J., Hrabovský, L.: Dopravní a manipulační zařízení IV. Ostrava: ES VŠB-TU Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0537-5.
ČSN 01 6910 Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory. srpen 1997. 36 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Robert Brázda, Ph.D.**

Datum zadání:

Datum odevzdání:

prof. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Tomáš Valčík

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Masarykova 1107

763 02, Zlín 4

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VALČÍK, T. *Demonstrační pneumatický dopravník: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2020, 46 stran, Vedoucí práce: doc. Ing. Robert Brázda, Ph.D.

Úkolem mé diplomové práce je navrhnout pneumatický dopravník, který má za úkol demonstrovat studentům rozdíl mezi podtlakovou a přetlakovou dopravou. Celá práce je rozdělena do jednotlivých kapitol. V první kapitole je rešerše pneumatické dopravy. Další kapitoly jsou zaměřeny na popis rozdílu podtlakové dopravy od přetlakové. Poté bylo mým úkolem najít vhodné dmychadlo, který bude sloužit jako zdroj pro dopravu podtlakem a přetlakem. Pro vhodné určení dmychadla je třeba rozsáhlého výpočtu pro dosažení minimálního potřebného tlaku a průtoku. Po vypočítání všech potřebných parametrů je třeba vzít v úvahu několik dmychadel a vybrat to nejvhodnější, pro můj případ použití. Po zvolení vhodného dmychadla je zapotřebí zvolit ještě vhodné komponenty do celkové sestavy pneumatického dopravníku. Posledním krokem mé diplomové práce je zhotovení sestavného výkresu celkové sestavy a několik dílčích výkresů.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

VALČÍK, T. *Pneumatic Conveyor for Demonstration: Diploma Thesis*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transportation, 2020, 46 pages, Thesis head: doc. Ing. Robert Brázda, Ph.D.

The aim of this diploma thesis is to design a pneumatic conveyor, which will demonstrate the difference between under-pressure and pressurized conveyance. The thesis is divided into several parts. The first chapter provides a summary of information about pneumatic conveyance. Following chapters explain the difference between under-pressure and pressurized conveyance. Subsequently we try to find an appropriate blower, which will propel the designed conveyor. In order to choose the right blower, it is necessary to make a complex calculation of minimal necessary pressure and flowage. After that we consider more potentially appropriate blowers. Finally we choose the one which is most suitable for this particular case. We also choose some other essential components for this pneumatic conveyor. The last task of this diploma thesis is to create a drawing of the whole conveyor and also drawings of its selected parts.

PODĚKOVÁNÍ

Své díky bych chtěl věnovat hlavně mým rodičům za jejich podporu, bez které by mi studium nebylo umožněno. Dále bych chtěl poděkovat lidem, kteří mi pomohli při tvorbě diplomové práce. Mému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Robertu Brázdovi Ph.D. za jeho cenné rady a usměrňování vývoje práce. Nesmím opomenout také doc. Ing. Leopolda Hrabovského, Ph.D. jehož výtky mě pomohli textové části diplomové práce.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů:.....	10
Úvod:.....	13
1. Pneumatická doprava:.....	13
1.1. Základní výpočty	13
2. Rozdělení pneumatických potrubních systémů:.....	15
2.1. Podle typu úpravy dopravovaného materiálu:.....	15
2.2. Podle tlaku v dopravním systému vzhledem k atmosférickému tlaku:.....	15
2.3. Podle uspořádání:	15
2.4. Podle maximální velikosti použitého tlaku vzduchu:	15
3. Podtlakové dopravníky:	16
4. Přetlakové dopravníky:.....	16
5. Kombinované dopravníky:.....	17
6. Zdroje podtlaku / přetlaku, dmychadla:	18
6.1. Způsob hledání vhodného dmychadla:.....	18
6.3. Minimální potřebný průtok:	29
6.4. Dmychadlo U71:.....	29
6.5. Dmychadlo U100:.....	30
6.6. Dmychadlo CEVF 3718-3 (31):	31
6.7. Zvolení dmychadla z návrhů:.....	32
7. Způsoby měření sypkých materiálů:	32
7.1. Měření v potrubních systémech:	32
Vlastnosti průtokoměrů sypkých látek:	33
7.2. Průtokoměr SolidFlow 2.0	33
Popis zařízení:	33
7.3. Průtokoměr SWR DensFlow:.....	34
Popis zařízení:	34
7.4. Průtokoměr MF 3000:	36
Popis zařízení:	36
Další informace o zařízení:	36
7.5. Signalizátor průtoku sypkých hmot 500M	37
Popis zařízení:	37
Další vlastnosti zařízení:	37
7.6. Pitotova a Prandtlova trubice.....	38
Popis zařízení:	38
7.7. Anemometry.....	39
Popis zařízení:	39
8. Určení vhodné trubice a další komponenty pro naši pneumatickou sestavu:	40
8.1. Volba vhodného potrubí, pro spojení dmychadla a zásobníku	40
8.2. Volba vhodné spony pro spojení hadi.....	41
9. Schéma řešené pneumatické dopravy	42

Závěr:.....	43
Zdroje informací:	44
Seznam příloh:	46

Seznam použitých značek a symbolů:

A	Příčný průřez potrubí	[m ²]
C_a	Tlakový součinitel	[-]
D	Průměr potrubí	[m]
F	Aerodynamická síla	[N]
F_G	Tíhová síla	[N]
F_r	Froudeho číslo potrubí	[-]
$F_{r\check{c}}$	Froudeho číslo	[-]
H	Výškový rozdíl ve vertikální poloze	[m]
L	Délka ve vodorovné poloze	[m]
M_m	Hmotnostní průtok materiálu	[kg/s]
M	Hmotnostní průtok plynu	[kg/s]
ΔP	Tlaková ztráta	[Pa]
Q_m	Hmotnostní tok materiálu	[kg/s]
Q_v	Hmotnostní tok vzduchu	[kg/s]
Re	Reynoldsovo číslo proudu	[-]
S	Průřez potrubí	[m ²]
V_s	Objem celkové směsi	[m ³]
V_v	Objem volného plynu	[m ³]
a	Hustota povrchu	[kg/m ³]
a_1	Velikost částice	[m]
c	Konstanta pro dopravovaný materiál	[-]
c_o	Konstanta pro dopravu bez materiálu	[-]
d	Vnitřní průměr potrubí	[m]
f	Součinitel tření materiálu o stěnu	[-]
g	Gravitační konstanta	[m/s ²]
k	Koeficient dopravy	[-]
Δp	Celková tlaková ztráta v PD	[Pa]

Δp_{atm}	Atmosférický tlak	[Pa]
Δp_d	Dynamická tlaková ztráta	[Pa]
Δp_n	Ztráty zvedáním materiálu	[Pa]
Δp_m	Ztráty v plnicím zařízení ekvivalentní ztrátě oblouku 90°	[Pa]
Δp_{m_1}	Počáteční urychlení materiálu	[Pa]
Δp_{m_2}	Ztráta třením materiálu	[Pa]
Δp_{m_3}	Ztráta zdvihem materiálu	[Pa]
Δp_{m_4}	Ztráty při průchodu materiálu místními odpory	[Pa]
Δp_o	Ztráty tlaku při proudění čistého vzduchu	[Pa]
Δp_{v_1}	Počáteční urychlení plynu	[Pa]
Δp_{v_2}	Ztráta třením plynu	[Pa]
Δp_{v_3}	Ztráta zdvihem plynu	[Pa]
Δp_{v_4}	Ztráta plynu místními odpory	[Pa]
r	Vnitřní poloměr potrubí	[m]
s	Rozvinutá délka potrubí	[m]
t	Teplota	[°C]
u	Rychlost individuální částice	[m/s]
u_{vz}	Rychlost vznosu částice	[m/s]
v	Dopravní rychlost	[m/s]
v_m	Rychlost materiálu	[m/s]
v_{kr}	Kritická rychlost	[m/s]
v_v	Rychlost vzduchu	[m/s]
v_{vz}	Vztlaková rychlost	[m/s]
β	Konstanta pro práškové materiály	[-]
β_p	Poměrná rychlost	[-]
β_1	Poměrná rychlost před zrychlením	[-]
β_2	Poměrná rychlost po zrychlení	[-]

β_x	Poměrná rychlost horizontální doprava	[-]
β_y	Poměrná rychlost vertikální doprava	[-]
γ	Součinitel polohy oblouku	[-]
$\delta\xi$	Dodatečný člen	[-]
ε	Mezerovitost / pórovitost	[-]
ζ	Ztrátový součinitel při průchodu plynu obloukem	[-]
ζ_1	Ztrátový součinitel	[-]
ζ_{obl}	Ztrátový součinitel při průchodu částic materiálu	[-]
λ	Součinitel tření	[-]
μ	Směšovací poměr	[-]
μ_1	Součinitel koncentrace dopravy	[-]
μ_2	Součinitel smykového tření mezi airsoftovými kuličkami a plastem	[-]
ν	Kinematická viskozita volného proudu vzduchu	[m ² /s]
ν_1	Sklon dopravy	[°]
ξ	Celkový součinitel odporu proti pohybu částice v potrubí	[-]
ξ_x	Součinitel odporu proti pohybu částice v horizontální části potrubí	[-]
ξ_y	Součinitel odporu proti pohybu částice ve vertikální části potrubí	[-]
ρ	Hustota plynu	[kg/m ³]
ρ_m	Hustota materiálu částice	[kg/m ³]
ρ_o	Měrná hmotnost	[kg/m ³]
ρ_v	Měrná hmotnost proudícího vzduchu	[kg/m ³]

Úvod:

1. Pneumatická doprava:

U tohoto způsobu dopravy se setkáme s dopravováním různorodého materiálu jako jsou materiály sypké a zrnité, nebo stébelnatých či vláknitých (seno, sláma).

Na rozdíl od mechanických dopravníků mají řadu výhod. Materiál se může dopravovat ve všech rovinách, i když se jedná o zakřivenou dráhu. Vhodné jsou zejména pak pro těžko přístupná místa. Během dopravy materiál není vystavován vnějšímu okolí, protože je v uzavřeném potrubí. Ztrácení materiálu je tímto také téměř eliminováno, a to i při velkých dopravních vzdálenostech. Automatizace provozu je umožněna díky snadné dálkové ovladatelnosti. [4] [5]

Avšak mezi nevýhody pneumatické dopravy patří velká energetická náročnost. Na jednotku materiálu se jedná o 4x až 6x větší energie než za stejných podmínek u mechanických dopravníků. U větších dopravních rychlostí dochází k velkému riziku rozbíjení materiálu o stěny potrubí. K nevýhodám dále patří neschopnost přepravování materiálů, které mají velkou měrnou hmotnost, sklon ke koagulaci nebo nalepování. [5]

Doprava materiálu v potrubí je zajišťována vzduchem. Hlavním předpokladem je vyvinutí dostatečného tlaku, aby se materiál začal unášet a nelepil se na stěny potrubí. To může vést až k jeho ucpání. [4]

1.1. Základní výpočty

Ve vertikálním směru jsou částice materiálu zatěžovány nepatrnými třecími silami. Hlavní zatížení je silou tíhovou a aerodynamickou. [6]

Ve vodorovném směru je pohyb materiálu složitější. V ose potrubí působí aerodynamická síla a zároveň je materiál namáhán tíhovou silou. Částice materiálu tak putuje po parabolické dráze. Pod účinkem tíhové síly jde dolů na stěnu potrubí čímž vypadne ze vzdušného proudu. Poté se částice odrazí od stěny. K odrazu dojde ve chvíli, kdy se zhušťují proudnice vzduchu. Tyto proudnice obtékají částice kutálejícího se materiálu. Výsledkem je vznik příčné turbulentní síly. Touto silou se uvede částice do pohybu po parabole vzhůru. Tato síla je také známá pod jménem Magnusova síla. Tímto způsobem se dostane zpět do vzdušného proudu. [6]

Částice se tedy pohybují ve vodorovném potrubí turbulentním prouděním. Vzájemně o sebe narážejí a taky naráží o stěnu potrubí. Je důležité proto zvolit dostatečnou rychlost proudění vzduchu jinak by mohlo dojít k ucpání potrubí. Pro

určení správné rychlosti vzduchu je tedy rozhodující vznosná rychlost. Ta se zároveň stává limitujícím faktorem kritického stavu dopravního procesu. Tento stav nastane, pokud aerodynamická síla bude v rovnováze se silou tíhovou. Teoreticky se tak zastaví částice materiálu a rychlost materiálu bude tedy nulová. [6]

Vztah pro rychlost materiálu:

$$F = F_G \Rightarrow v_m = 0 \quad (1.1)$$

Vyjádření tíhové síly pro tento případ:

$$F_G = k \cdot S \cdot \rho_v \cdot \frac{v^2}{2} \quad (1.2)$$

Vztah pro vznosnou rychlost:

$$v_{vz} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_G}{k \cdot S \cdot \rho_v}} \quad (1.3)$$

Vztah pro kritickou rychlost:

$$v_{kr} = c \cdot (\xi \cdot a \cdot g \cdot D)^{0,5} \quad (1.4)$$

Pro bezpečné pohybování materiálu v potrubí je nutné, aby byla provozní rychlost větší než rychlost vznosná. Toto zvětšení ovlivňuje nejen měrná hmotnost, ale také součinitel koncentrace pneumatické dopravy. [6]

Součinitel koncentrace pneumatické dopravy:

$$\mu_1 = \frac{Q_m}{Q_v} \quad (1.5)$$

U pneumatické dopravy provzdušňovaného materiálu se setkáváme s další veličinou. Jedná se o tzv. mezerovitost nebo pórovitost. [9]

Výpočet mezerovitosti / pórovitosti:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.6)$$

Vypočítání tlakové ztráty je poněkud obtížné vhodný pro numerický výpočet za pomoci počítačových programů, proto se provedou určitá zjednodušení. [9]

Určení tlakové ztráty:

$$\Delta P = \Delta p + \Delta p_d + \Delta p_n + \Delta p_m \quad (1.7)$$

Přibližně lze tlakovou ztrátu stanovit:

$$\Delta p = \Delta p_o \cdot \left(1 + c_o \cdot \xi \cdot \frac{a_1 \cdot g \cdot D}{v^2} \right) \quad (1.8)$$

Dynamická ztráta:

$$\Delta p_d = \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \rho_o \cdot (1 + \beta \cdot \xi) \cdot 10^{-4} \quad (1.9)$$

Ztráty zvedáním materiálu:

$$\Delta p_n = \varepsilon \cdot \rho \cdot \mu \cdot \frac{v}{u} \cdot g \cdot H \quad (1.10)$$

2. Rozdělení pneumatických potrubních systémů:

Pneumatická potrubní doprava má mnoho aplikací, kde se využívá. Byla vyvinuta celá řada dopravních systémů, které se lze rozdělit takto: [7] [8]

2.1. Podle typu úpravy dopravovaného materiálu:

- Doprava drceného materiálu
- Doprava nedrceného materiálu
- Doprava materiálu v pytlích
- Doprava materiálu v pevných pouzdrech nebo kontejnerech

2.2. Podle tlaku v dopravním systému vzhledem k atmosférickému tlaku:

- Podtlaková
- Přetlaková
- Smíšená

2.3. Podle uspořádání:

- Otevřené systémy
- Uzavřené systémy
- Polouzavřené systémy

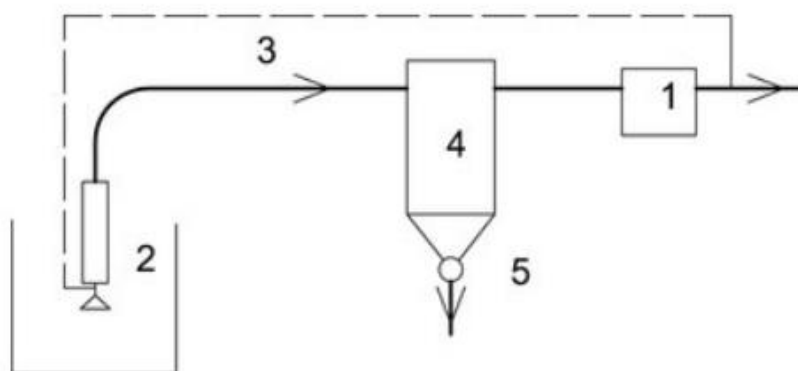
2.4. Podle maximální velikosti použitého tlaku vzduchu:

- Vysokotlaké
- Středotlaké
- Nízkotlaké

3. Podtlakové dopravníky:

Použití nalezneme u ukládání sypkého materiálu z různých skladovacích prostorů na jiné místo určené pro skladování. Materiál je nasáván pod tlakem. Spolu s materiálem je nasáván i vzduch, kterým je materiál nesen. Nasávací ústrojí se nazývá sací jehla. Po nasátí pokračuje materiál do cyklonu, kde se odloučí mat od přebytečného vzduchu. Odsávání vzduchu je možné za pomoci dmyhadla. Klíčové u této dopravy je zvolení vhodného dmyhadla a také sací jehly. [4] [5]

Mezi výhody se řadí možnost odsání materiálu, i když je to z těžko přístupného místa.



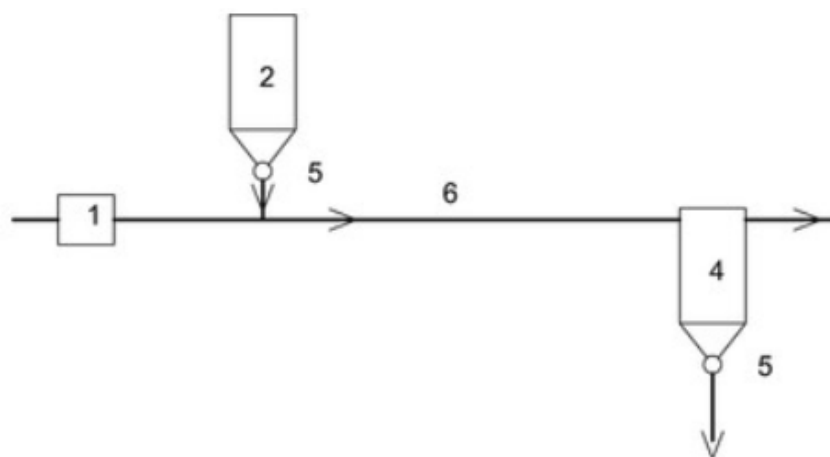
obr.1. – podtlaková pneumatická doprava [8]

(1) zdroj hnacího plynu, (2) násypka, (3) potrubí, (4) odlučovač, (5) turniketový podavač

4. Přetlakové dopravníky:

Princip přetlakové dopravy je podobný jako to je u podtlakové. Nesetkáme se zde se sací jehlou. Na spodu zásobníku, ze kterého materiál dopravujeme se nachází dmyhadlo. Dmyhadlo produkuje tlakový vzduch, který vhání padající materiál ze zásobníku do potrubí. Potrubím dále pokračuje do místa, kde potřebujeme materiál dopravit. S tímto typem dopravy se můžeme setkat například u moderních strojních omítacích sestav. Tyto stroje používají přetlaku, který žene hadicí dopravovanou omítnací směs na místo, kde je omítka stříkána.

Výhoda přetlakové oproti dopravě pod tlakem je možnosti dopravovat na větší vzdálenosti a do větších výšek. [4] [5]



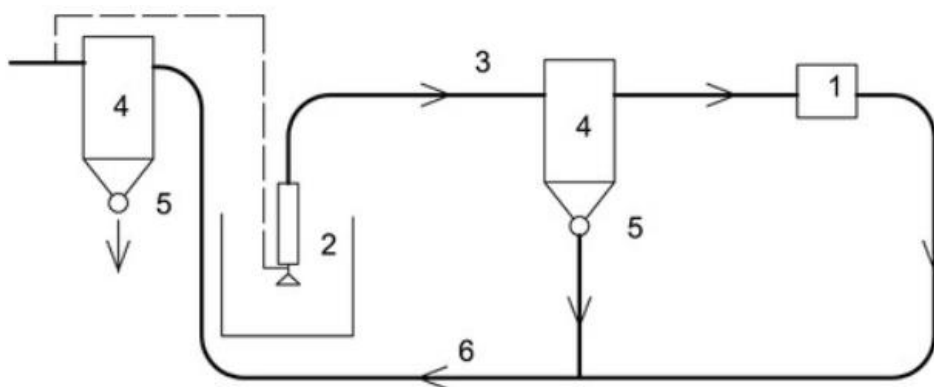
obr.2. – přetlaková pneumatická doprava [8]

(1) zdroj hnacího plynu, (2) násypka, (4) odlučovač, (5) turniketový podavač, (6) potrubní přetlakové části

5. Kombinované dopravníky:

Tyto dopravníky mají výhody obou předchozích systémů. Můžou brát materiál i z těžko dostupných míst a dosahovat velkých výšek a dalek. Provoz je možné plynule automatizovat.

Materiál je přiváděn do potrubí sací jehlou dále je přiváděn do cyklónu, kde je vzduch odloučen od materiálu. Za působení gravitace materiál padá dolů přímo do turniketového podavače. Podavač dále materiál vpravuje do potrubí, které je natlakované dmychadlem. Díky přetlaku je poté hnán až na místo určení. [4] [5]



obr.3. – smíšená pneumatická doprava [8]

(1) zdroj hnacího plynu, (2) násypka, (3) potrubí, (4) odlučovač, (5) turniketový podavač, (6) potrubní přetlakové části

6. Zdroje podtlaku / přetlaku, dmyhadla:

6.1. Způsob hledání vhodného dmyhadla:

Při volbě vhodného dmyhadla se v první řadě zaměřuji na pracovní tlaky. Dalším parametrem, na který se zaměřuji je velikost průtoku. Při hledání chci také docílit, pokud možno co největší životnosti.

6.2. Výpočet pracovního tlaku:

U výpočtu tlaku máme v podstatě dvě možnosti, jak počítat. Za první můžeme provést výpočet pro případ nízkotlaké dopravy anebo střední či vysokotlaké dopravy.

Střední a vysokotlaká doprava se musí počítat s hustotou plynu, který u větších délek trasy expanduje a mění se tak rychlost. Výpočet střední a vysokotlaké dopravy je mnohonásobně komplikovanější, proto se v tomto případě obvykle zjednodušuje.

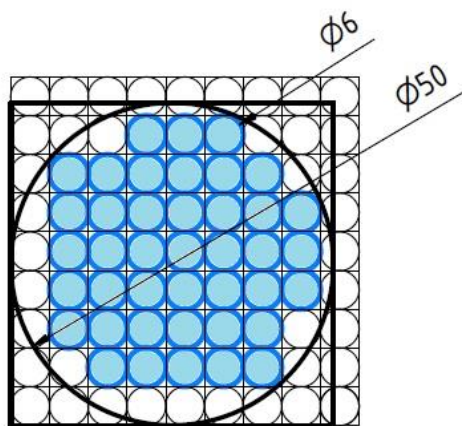
V našem případě se jedná o krátkou trasu, kde expanzi plynu zanedbáme a budeme se řídit jednodušším nízkotlakým výpočtem.

Ztráta počátečním urychlením plynu Δp_{v1} :

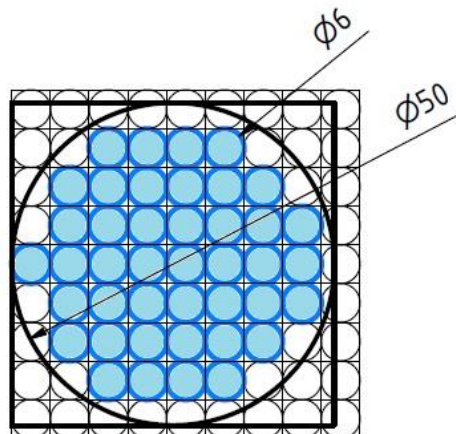
Můžeme předpokládat, že součin $\varepsilon \cdot p = \text{konst}$, pak je možné rovnici integrovat mezi místem 1 (okolí) a místem 2 (vstupní průřez). Ztrátu počátečním urychlením plynu, pak vyjádříme viz vzorec (6.11).

Určení poréznosti:

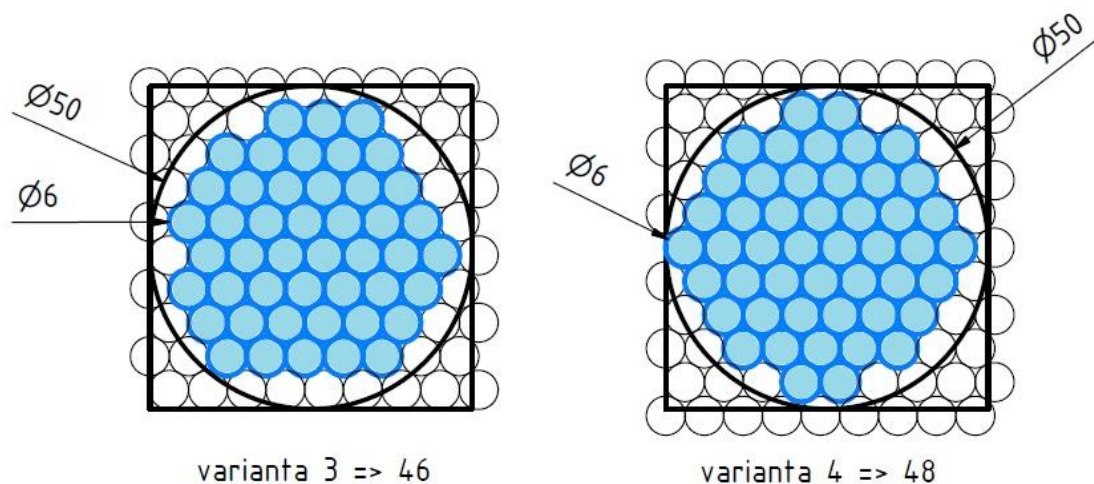
Pro určení poréznosti, jsem zvolil metodu vyobrazení čtyř krizových případů. Vyobrazují maximální možné zaplnění trubice PD airsoftovými kuličkami. Prakticky je toto zaplnění, téměř nemožné. Výpočty budou však dimenzovány na maximální možné zaplnění.



varianta 1 => 41



varianta 2 => 42



obr.4. – Vyobrazení čtyř variant zaplnění trubice PD [21]

$$\varepsilon_1 = \frac{S_{m1}}{S_{sm}} = \frac{1\,159,25}{1\,963,50} = \mathbf{0,59} \quad (6.1)$$

$$S_{m1} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_1 = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} \cdot 41 = 1\,159,25 \, mm^2 \quad (6.2)$$

$$S_{sm} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 50^2}{4} = 1\,963,50 \, mm^2 \quad (6.3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{S_{m2}}{S_{sm}} = \frac{1\,187,52}{1\,963,50} = \mathbf{0,605} \quad (6.4)$$

$$S_{m2} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_2 = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} \cdot 42 = 1\,187,52 \, mm^2 \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{S_{m3}}{S_{sm}} = \frac{1\,300,61}{1\,963,50} = \mathbf{0,662} \quad (6.6)$$

$$S_{m3} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_3 = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} \cdot 46 = 1\,300,61 \, mm^2 \quad (6.7)$$

$$\varepsilon_4 = \frac{S_{m4}}{S_{sm}} = \frac{1\,357,17}{1\,963,50} = \mathbf{0,691} \quad (6.8)$$

$$S_{m4} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_4 = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} \cdot 48 = 1\,357,17 \, mm^2 \quad (6.9)$$

Ve výpočtech bude dále používat maximální hodnotu poréznosti.

$$\varepsilon = \mathbf{0,691 = 69,1 \, \%}$$

U našeho příkladu je plynem vzduch a pokojová teplota 20 °C, pak tyto podklady použijeme při hledání hodnoty hustoty plynu v tabulkách.

$$\rho = 1,2047[\text{kg/m}^3]$$

Doporučení vzorce pro volbu dopravní rychlosti.

$$v \geq 1,1 \cdot u_{vz}$$

Určení rychlosti částice u_{vz} a následná volba dopravní rychlosti:

Rychlost byla určena pomocí měření na pneumatickém dopravníku. Měřící metoda, která byla použita byl anemometr UNI-T UT362, a také pitotova trubice.

	ANEMOMETR UNI-T UT362				
	rychlost MIN	25,3	[m/s]		
	rychlost MAX	50	[m/s]		
d_1	vnitřní průměr přístroje	0,04	[m]		
S	Průřez	0,001257	[m ²]		
Q_1	průtok MIN	0,031793	[m ³ /s]	31,79292	[l/s]
Q_2	průtok MAX	0,062832	[m ³ /s]	62,83185	[l/s]

tab.1. – Zaznamenání hodnot z měření proudění vzduchu anemometrem [21]

	PITOTOVA TRUBICE				
	rychlost MIN	26	[m/s]		
	rychlost MAX	56	[m/s]		
d_1	vnitřní průměr přístroje	0,04	[m]		
S	Průřez	0,001257	[m ²]		
Q_1	průtok MIN výpočtem	0,032673	[m ³ /s]	32,67256	[l/s]
Q_2	průtok MAX výpočtem	0,070372	[m ³ /s]	70,37168	[l/s]
Q_1	průtok MIN naměřeno	140	[m ³ /h]	38,88889	[l/s]
Q_2	průtok MAX naměřeno	260	[m ³ /h]	72,22222	[l/s]

tab.2. – Zaznamenání hodnot z měření proudění vzduchu pitotovou trubicí [21]

Z výpočtů vyplývá, že minimální rychlost u vzduchu byla zaznamenána jako 25,3 m/s. Pro ověření měření rychlosti částice v PD tedy platí, že rychlost musí vycházet nižší.

Pro měření rychlosti vnosu částice jsme použili měřící zařízení, které vytvořil Ing. Aleš Procházka, Ph.D. Na tomto zařízení byla naměřena následující hodnota.



obr.5. – Měřicí zařízení pro určení rychlosti vznosu částice [21]

$$u_{vz} = 15[m/s]$$

$$v = 1,1 \cdot u_{vz} \quad (6.10)$$

$$v = 1,1 \cdot 15$$

$$v = 16,5 [m/s]$$

Ztráta počátečním urychlením plynu Δp_{v1} :

$$\Delta p_{v1} = \varepsilon \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cong p_d \quad (6.11)$$

$$\Delta p_{v1} = 0,691 \cdot 1,2047 \cdot \frac{16,5^2}{2} \cong p_d$$

$$\Delta p_{v1} \cong p_d = \quad \quad \quad \mathbf{113,3169 [Pa]}$$

Ztráta počátečním urychlením materiálu Δp_{m1} :

$$-\frac{dp}{ds} = C_M \frac{1}{2} \frac{d(u^2)}{ds} \quad (6.12)$$

Tento vztah můžeme upravit vyjádřením diferenciálu $d(u^2)$ jako $2 \cdot u \cdot du$ a rychlosti částice $u = \beta \cdot v$ potom vznikne vztah.

$$-dp = \varepsilon \cdot \rho \cdot \mu \cdot v \cdot du \quad (6.13)$$

Dále můžeme rovnici upravit, když víme že součin $\varepsilon \cdot \rho \cdot \mu \cdot v = \text{konst.}$ Celý vztah se dá integrovat za předpokladu, že počáteční rychlost $u_0=0$.

$$\Delta p_{m1} = 2 \cdot \mu \cdot \frac{u}{v} \cdot p_d \quad (6.14)$$

Určení směšovacího poměru:

$$\mu = \beta \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho_m}{\rho} \quad (6.15)$$

Pro určení poměrné rychlosti platí následující vzorec:

$$\beta = \frac{u}{v} \quad (6.16)$$

Abychom mohli poměrnou rychlost určit, potřebujeme vypočítat nejprve rychlost individuální částice značenou u .

$$\beta = \frac{u}{v} = \beta_y \Rightarrow u = \beta_y \cdot v \quad (6.17)$$

Dalším krokem je zjistit poměrnou rychlost vertikální dopravy značenou β_y .

$$\beta_y = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\xi_y}{2 \cdot Fr_{\xi}}\right) \cdot \left(1 - \frac{u_{vz}^2}{v^2}\right)}}{1 - \frac{\xi_y}{2 \cdot Fr_{\xi}}} \quad (6.18)$$

Pokud není součinitel odporu proti pohybu částice v potrubí přímo definován materiálem. Počítáme se všeobecnou hodnotu 0,005.

$$\xi_y = 0,005 [-]$$

Froudeho číslo, které potřebujeme znát, se vypočítá z následujícího vztahu.

$$Fr_{\xi} = \frac{g \cdot d}{u_{vz}^2} \quad (6.19)$$

$$Fr_{\xi} = \frac{9,81 \cdot 0,05}{15^2}$$

$$Fr_{\xi} = 0,00218 [-]$$

Dosazování do vzorce pro výpočet poměrné rychlosti vertikální dopravy

$$\beta_y = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{0,005}{2 \cdot 0,00218}\right) \cdot \left(1 - \frac{15^2}{16,5^2}\right)}}{1 - \frac{0,005}{2 \cdot 0,00218}}$$

$$\beta_y = 0,086231112 [-]$$

Dosazení do vzorce pro výpočet rychlosti individuální částice

$$u = 0,086231112 \cdot 16,5$$

$$u = 1,42281 [m/s]$$

$$\beta = \frac{u}{v} = \beta_y = 0,086231112 [-]$$

Z tabulek vyhledáme hodnotu pro hustotu materiálu částic. [23]

$$\rho = 800[kg/m^3]$$

Dosazení do vzorce pro výpočet směšovacího poměru

$$\mu = 0,086231112 \cdot \frac{1 - 0,691}{0,691} \cdot \frac{800}{1,2047}$$

$$\mu = 17,69430645 [-]$$

Dosazení do vzorce pro vypočítání tlakového spádu k počátečnímu urychlení materiálu Δp_{m1}

$$\Delta p_{m1} = 2 \cdot 17,69 \cdot \frac{1,42}{16,5} \cdot 113,3169$$

$$\Delta p_{m1} = 345,7979 [Pa]$$

Mohli bychom dále upravit tento vztah tím, že bychom vložili do potrubí přivádějící materiál naváděcí plech $u_0 \neq 0$ což by vedlo ke snížení počáteční ztrátě urychlením materiálu.

Ztráta třením plynu Δp_{v2} :

$$\Delta p_{v2} = \frac{\lambda}{d} \cdot s \cdot p_d \quad (6.20)$$

Kde s je rozvinutá délka potrubí, např L (celková výška) + H (celková výška), p_d je dynamický tlak, pro který platí vztah

Pro výpočet součinitele tření volím vzorec dle vztahu Altušuly:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,82 \cdot \log \frac{Re}{100} + 2\right)^2} \quad (6.21)$$

Klasický výpočet Reynoldsova čísla proudu pro rozmezí $Re =$ (od $5,8 \cdot 10^4$ po $4 \cdot 10^5$)

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (6.22)$$

Kinematickou viskozitu volného proudu vzduchu lze podle Goldsteina lze určit empirickým vzorcem.

$$\nu = 0,1556 \left(\frac{(273,15 + t)}{298,16} \right)^{1,7774} \cdot \left(\frac{1,013 \cdot 10^5}{p_{atm}} \right) \cdot 10^{-4} \quad (6.23)$$

Měřicí podmínky jsou při pokojové teplotě 20 °C a normálním atmosférickém tlaku.

$$t = 20 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$p_{atm} = 101\,325 \text{ [Pa]}$$

Dosazení do vzorce pro výpočet kinematické viskozity volného proudícího vzduchu.

$$\nu = 0,1556 \left(\frac{(273,15 + 20)}{298,16} \right)^{1,7774} \cdot \left(\frac{1,013 \cdot 10^5}{101325} \right) \cdot 10^{-4}$$

$$\nu = 0,000015 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

Dosazení do vzorce pro výpočet Reynoldsova čísla.

$$Re = \frac{16,5 \cdot 0,05}{0,000015}$$

$$Re = 54\,655,298 \text{ [-]}$$

Dosazení do vzorce pro výpočet součinitel tření.

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,82 \cdot \log \frac{54\,655,298}{100} + 2 \right)^2}$$

$$\lambda = 0,0205 \text{ [-]}$$

Dosazení do vzorce pro výpočet ztráty třením plynu Δp_{v2} :

$$\Delta p_{v2} = \frac{0,0205}{0,05} \cdot 2 \cdot 113,3169$$

$$\Delta p_{v2} = 92,9681 \text{ [Pa]}$$

$$p_d = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (6.24)$$

Ztráta třením materiálu Δp_{m2} :

$$\Delta p_{m2} = k \cdot \mu \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot s \cdot p_d = k \cdot \mu \cdot \Delta p_{v2} \quad (6.25)$$

Výpočet součinitele dopravy provedeme, dle následujícího vztahu.

$$k = \frac{2 \cdot \frac{u_{vz}}{v} \cdot \cos v}{\lambda \cdot \frac{u}{v} \cdot \frac{1}{F_r}} + \frac{\xi_y}{\lambda} \cdot \frac{u}{v} \quad (6.26)$$

Froudeho číslo potrubí se vypočítá z následujícího vztahu.

$$Fr = \frac{g \cdot d}{v^2} \quad (6.27)$$

$$Fr = \frac{9,81 \cdot 0,05}{16,5^2}$$

$$Fr = 0,00182 [-]$$

Maximální sklon dopravy v našem případě bude 45°

$$v = 45 [^\circ]$$

Dosazením do vzorce pro výpočet součinitele dopravy

$$k = \frac{2 \cdot \frac{15}{16,5} \cdot \cos 45^\circ}{0,0205 \cdot \frac{1,4228}{16,5} \cdot \frac{1}{0,00182}} + \frac{0,005}{0,0205} \cdot \frac{1,4228}{16,5}$$

$$k = 1,198 [-]$$

Dosazení do vzorce pro výpočet ztráty třením částice Δp_{m2} :

$$\Delta p_{m2} = 1,198 \cdot 17,69 \cdot 92,9681$$

$$\Delta p_{m2} = 1\,971,1968 [Pa]$$

Ztráta zdvihem plynu Δp_{v3} :

$$\Delta p_{v3} = \varepsilon \cdot \rho \cdot g \cdot s \cdot \sin v = \varepsilon \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (6.28)$$

Kde H je výška u svislé složky dopravy nebo pokud se jedná o dopravu šikmou platí pak $H = s \cdot \sin v$. Ve většině případů lze tuto ztrátu zanedbat. Maximální výšku u pneumatické dopravy v našem případě bude 1 m.

$$H = 1 [m]$$

$$\Delta p_{v3} = 0,691 \cdot 1,2047 \cdot 9,81 \cdot 1$$

$$\Delta p_{v3} = 11,8181 [Pa]$$

Ztráta zdvihem materiálu Δp_{m3} :

$$\Delta p_{m3} = \varepsilon \cdot \rho \cdot \mu \cdot \frac{v}{u} \cdot g \cdot s \cdot \sin v = \varepsilon \cdot \rho \cdot \mu \cdot \frac{v}{u} \cdot g \cdot H \quad (6.29)$$

$$\Delta p_{m3} = 0,691 \cdot 1,2047 \cdot 17,69 \cdot \frac{16,5}{1,43} \cdot 9,81 \cdot 1$$

$$\Delta p_{m3} = \mathbf{2\,425,032\,[Pa]}$$

Obdobně jako u ztráty zdvihem plynu platí, že H je výška u svislé složky dopravy nebo pokud se jedná o dopravu šikmou platí pak $H = s \cdot \sin v$. Ve většině případů lze tuto ztrátu zanedbat.

Ztráta plynu místními odpory Δp_{v4} :

Převážně se jedná o oblouky a tlakovou ztrátu vyjádříme následovně.

$$\Delta p_{v4} = \sum \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho = \sum \zeta \cdot p_d \quad (6.30)$$

Ztrátový součinitel při průchodu částic materiálu obloukem.

$$\zeta_{obl} = 2 \cdot \varepsilon \cdot (\beta_1 - \beta_2) \quad (6.31)$$

Poměrná rychlost po zrychlení, je na rovném úseku rovna hodnotě β .

$$\beta_2 = \beta = \mathbf{0,086231112\,[-]}$$

Poměrná rychlost před zrychlením.

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{u_2}{u_1} = \exp\left(-\frac{\pi \cdot f}{2}\right) \Rightarrow \beta_1 = \frac{\beta_2}{\exp\left(-\frac{\pi \cdot f}{2}\right)} \quad (6.32)$$

Součinitel tření materiálu o stěnu potrubí, v našem případě je tento součinitel roven součiniteli μ . Součinitel μ určuje hodnotu smykového tření mezi airsoftovými kuličkami a plastem a je roven 0,3.

$$\mathbf{f = 0,3}$$

Dosazení do vzorce pro výpočet poměrné rychlosti před zrychlením.

$$\beta_1 = \frac{0,08623}{\exp\left(-\frac{\pi \cdot 0,3}{2}\right)}$$

$$\beta_1 = \mathbf{0,138140315\,[-]}$$

Dosazení do vzorce pro výpočet ztrátového součinitele při průchodu částic materiálu obloukem.

$$\zeta_{obl} = 2 \cdot 0,691 \cdot (0,138140315 - 0,086231112)$$

$$\zeta_{obl} = 0,071738518 [-]$$

Ztrátový součinitel při průchodu plynem obloukem.

$$\zeta = C_a \cdot \zeta_1 \quad (6.33)$$

Tlakový součinitel

Vzorec, pro výpočet této veličiny se volí, dle úhlu sklonu PD. Pro méně jak 45° je vztah $C_a = 0,9 \cdot \sin v$ pro větší jak 45° , pak $C_a = -1,53 + 1,3 \cdot \log v$ (pro $45^\circ < v < 180^\circ$). U našeho případu se jedná o vztah druhý.

$$C_a = -1,53 + 1,3 \cdot \log v \quad (6.34)$$

$$C_a = -1,53 + 1,3 \cdot \log 45^\circ$$

$$C_a = 0,6919176268 [-]$$

Ztrátový součinitel

$$\zeta_1 = 0,34 \cdot \left(d/r\right)^{3/4}$$

$$\zeta_1 = 0,34 \cdot \left(0,05/0,025\right)^{3/4}$$

$$\zeta_1 = 0,571809562 [-]$$

Dosazení do vzorce pro výpočet ztrátového součinitele při průchodu plynem obloukem.

$$\zeta = 0,6919176268 \cdot 0,571809562$$

$$\zeta = 0,354050911 [-]$$

Dosazení do vzorce pro výpočet ztráty plynu místními odpory.

$$\Delta p_{v4} = (0,354050911 + 0,571809562 + 0,071738518) \cdot 113,32$$

$$\Delta p_{v4} = 113,0449 [Pa]$$

Kde $\sum \zeta$ je součet všech ztrátových součinitelů při průchodu plynu obloukem.

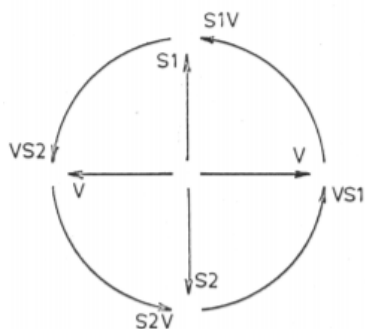
Ztráta při průchodu materiálu místními odpory Δp_{m4} :

$$\Delta p_{m4} \cong \sum \zeta_{obl} \cdot \mu \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (6.35)$$

Vyjádření jednotlivých hodnot ztrátového součinitele ζ_{obl} je zdlouhavý a komplikovaný, proto na základě zkušeností z provozu uvádí pán Vávra zjednodušený vztah podle Dzadzia. [19] [20]

$$\Delta p_{m4} \cong \mu \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \cdot \sum \gamma \cdot \zeta \quad (6.36)$$

Součinitel polohy oblouku má pouze dvě možné hodnoty. Pokud se jedná o nejvíce výhodnou polohu pak $\gamma = 4$, pro všechny ostatní polohy oblouku pro vodorovnou či vodorovnou rovinu platí $\gamma = 1$.



Obr.6. – Označení polohy oblouku [19]

$$\gamma = 1$$

Dosazení do vzorce pro výpočet ztráty při průchodu materiálu místními odpory.

$$\Delta p_{m4} = 17,694 \cdot \frac{16,5^2}{2} \cdot 1,2047 \cdot 1 \cdot 0,3541$$

$$\Delta p_{m4} = \quad \quad \quad \mathbf{1027,3444 [Pa]}$$

Celková tlaková ztráta Δp :

Celkovou tlakovou ztrátu lze na základě principu aditivnosti vyjádřit následovně.

$$\Delta p = \sum_{i=1}^4 \Delta p_{vi} + \sum_{i=1}^4 \Delta p_{mi} \quad (6.37)$$

$$\Delta p = (\Delta p_{v1} + \Delta p_{v2} + \Delta p_{v3} + \Delta p_{v4}) + (\Delta p_{m1} + \Delta p_{m2} + \Delta p_{m3} + \Delta p_{m4})$$

$$\Delta p = 113,3169 + 92,9681 + 11,8181 + 113,0449 + 345,7979 + 1\,971,196 + 2\,425,032 + 1\,027,3444$$

$$\underline{\underline{\Delta p = \quad \quad \quad \mathbf{6\,100,5194 [Pa]}}}$$

6.3. Minimální potřebný průtok:

$$Q_{min} = S \cdot v = \frac{\pi \cdot d_{potrubí}^2}{4} \cdot u_{vz}$$

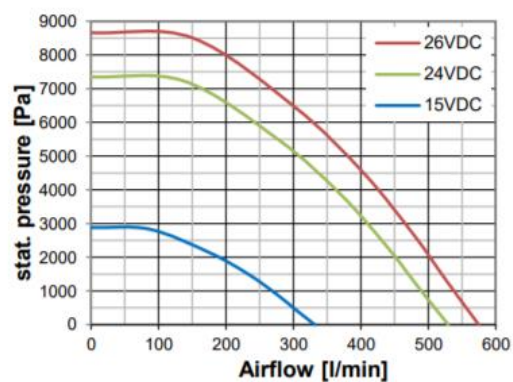
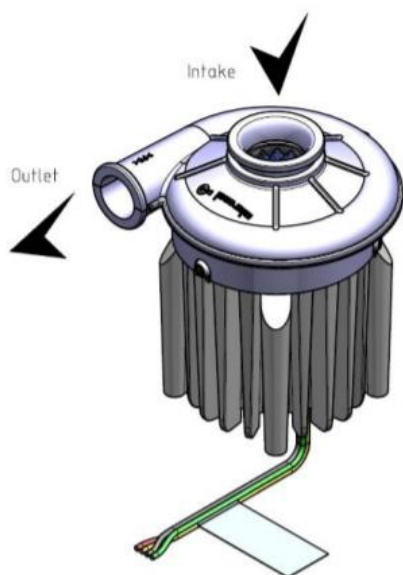
$$Q_{min} = \frac{\pi \cdot 0,05^2}{4} \cdot 15$$

$$Q_{min} = 0,00785 [m^3/s] = 7,85[l/s] = 471[l/min]$$

6.4. Dmychadlo U71:

Specifikace – parametry						
Typové označení	Napájecí napětí (V)	Otáčky (min ⁻¹)	Průtok (l/min)	Tlak (Pa)	Hlučnost (dB)	Životnost (h)
U71HX-024KX-6	24	33103	474	4819	49	20000
U71MX-024KX-5	24	39412	409	3897	47	20000
U71MX-024KX-4	24	28900	395	4100	47	20000
U71HL-024KM-4	24	37600	530	7400	62,7	10000

obr.7. – vzduchové lineární pumpy [10]



obr.8. – vzduchové lineární pumpy [10]

Dmychadlo jsem volil z předpokladu, že maximální ztrátový tlak v našem případě je 6 100 Pa a minimální potřebný průtok je 471 l/min. Uvažuji o zvolení dmychadla **U71HL-024KM-4**, které má pracovní tlak až 7 400 Pa a průtok vzduchu **530 l/min**.

6.5. Dmychadlo U100:

Specifikace – parametry

Typové označení	Napájecí napětí (V)	Otáčky (min ⁻¹)	Průtok (l/min)	Tlak (Pa)	Hlučnost (dB)	Životnost L10 (h)
U100HL-024KA-4	24	43000	860	11900	55	20000

obr.9. – vzduchové lineární pumpy [11]

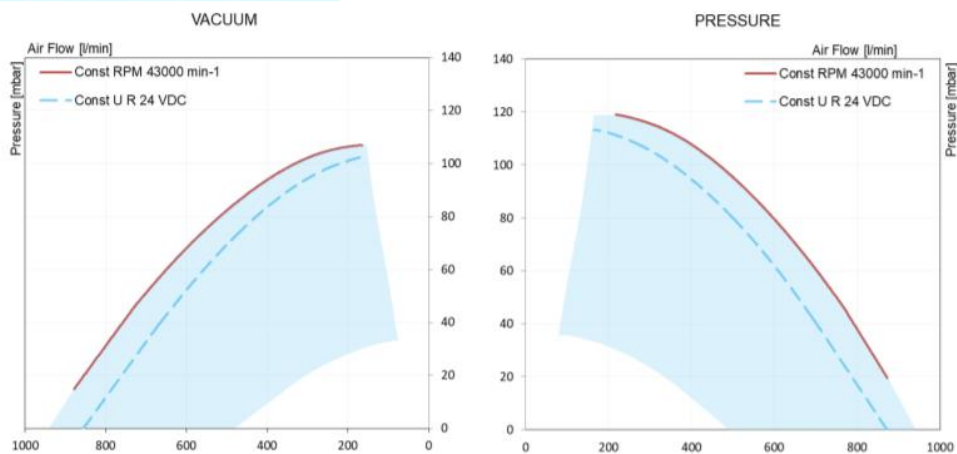
DATA SHEET U100HL-024KA-4



DESCRIPTION

Compact vacuum and pressure blower with an efficient motor, all-aluminum housing, IP67, integrated electronics, M16 connector, G3/4 inch pipe thread and 32 mm hose connection.

PERFORMANCE FIELDS



obr.10. – vzduchové lineární pumpy [11]

Dmychadlo jsem volil z předpokladu, že maximální ztrátový tlak v našem případě je 6 100 Pa a minimální potřebný průtok je 471 l/min. Uvažuji o zvolení dmychadla **U100HL-024KA-4**, které má pracovní tlak až 11 900 Pa a průtok vzduchu **960 l/min**. Tohle dmychadlo se mi však zdá poměrně dost předimenzované a záleželo by tedy na rozpočtu firmy, která by tento projekt financovala.

6.6. Dmychadlo CEVF 3718-3 (31):



CEVF (31)

Mehrstufige Radialgebläse für Vakuumbetrieb mit hohem Filtertopf und Sammelbehälter. Volumenströme bis 7,8 m³/min, Gesamtdifferenzdruck bis 70 mbar.

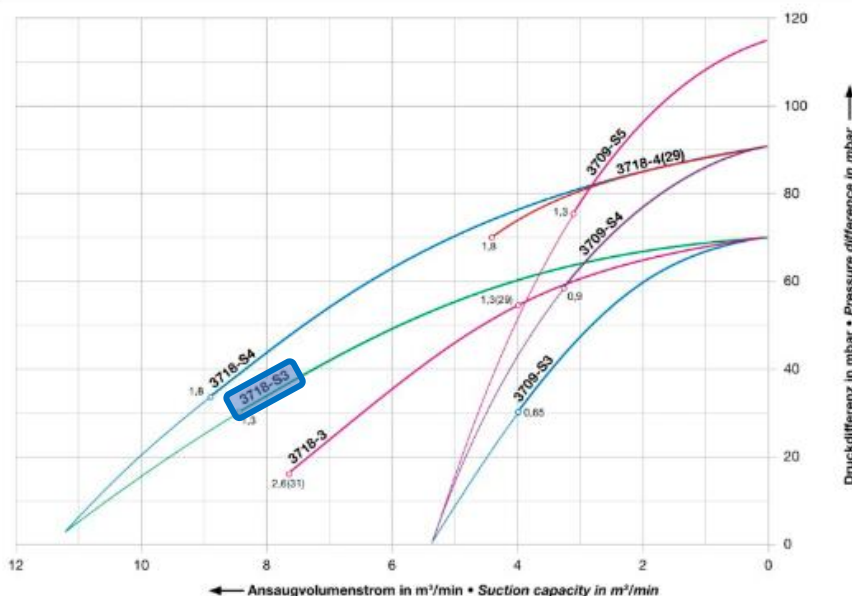
Multi stage radial blowers for vacuum operation complete with filter vessel and collection bin. Capacities up to 7.8 m³/min. Total pressure difference up to 70 mbar.

Auswahl- und Bestelldaten 50 und 60 Hz • Selection and ordering data 50 and 60 Hz

Bestell-Nr.	Frequenz	Leistung	Motor (IP55, Wärmeklasse F)	Gewicht ca.	Schall-druck-pegel
Order No.	Frequency	output	Motor (IP55, insulation class F)	Weight approx.	Sound pressure level
	Hz	kW	voltage	kg	dB(A)
CEV 3709-S3	50	0,55	230 Δ / 400 Y	30	72
	60	0,65	220 Δ / 380 Y		73
CEV 3709-S4	50	0,75	230 Δ / 400 Y	38	73
	60	0,9	220 Δ / 380 Y		74
CEV 3709-S5	50	1,1	230 Δ / 400 Y	42	73
	60	1,3	220 Δ / 380 Y		74
CEV 3718-S3	50	1,1	230 Δ / 400 Y	38	75
	60	1,3	220 Δ / 380 Y		76
CEV 3718-S4	50	1,5	230 Δ / 400 Y	42	75
	60	1,8	220 Δ / 380 Y		76
CEVF 3718-3 (29)	50	1,1	230 Δ / 400 Y	40	72
	60	1,3	220 Δ / 380 Y		73
CEVF 3718-3 (31)	50	2,2	230 Δ / 400 Y	52	74
	60	2,6	220 Δ / 380 Y		75
CEVF 3718-4 (29)	50	1,5	230 Δ / 400 Y	44	73
	60	1,8	220 Δ / 380 Y		74

obr.11. – tabulka dmychadel CEVF [12]

60 Hz Auswahl diagramm • Selection diagram

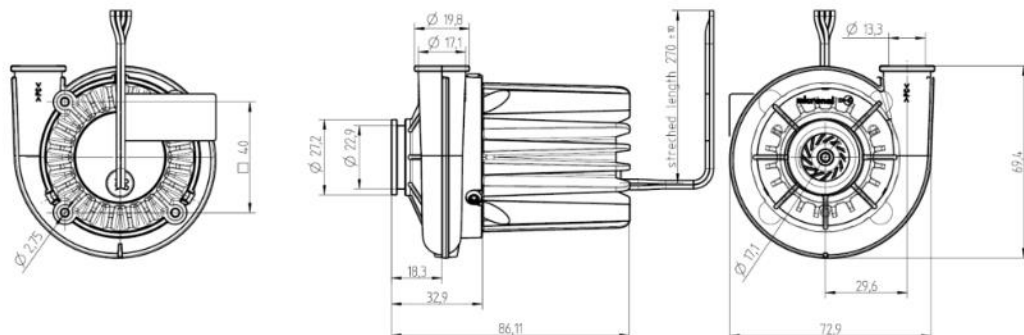


obr.12. – graf dmychadla CEVF [12]

Dmychadlo jsem volil z předpokladu, že maximální ztrátový tlak v našem případě je 6 100 Pa a minimální potřebný průtok je 471 l/min. Uvažuji o zvolení dmychadla **CEVF 3718-3**, které má pracovní tlak až 7 000 Pa a průtok vzduchu **11,2m³/min = 11 200 l/min**. Tohle dmychadlo může vyvinout ideální tlak, ale má velké rozměry, a proto se mi zdá na demonstrační pneumatický dopravník nevhodný.

6.7. Zvolení dmychadla z návrhů:

Při porovnávání navržených dmychadel jsem se rozhodl pro dmychadlo **U71HL-024KM-4**. Z dmychadel, co jsem bral v úvahu mi přijde nevýhodnější. Je schopné vyvodit ideální tlak a má taky menší pořizovací náklady a rozměry.



obr.13. – rozměry dmychadla U71HL-024KM-4 [10]

7. Způsoby měření sypkých materiálů:

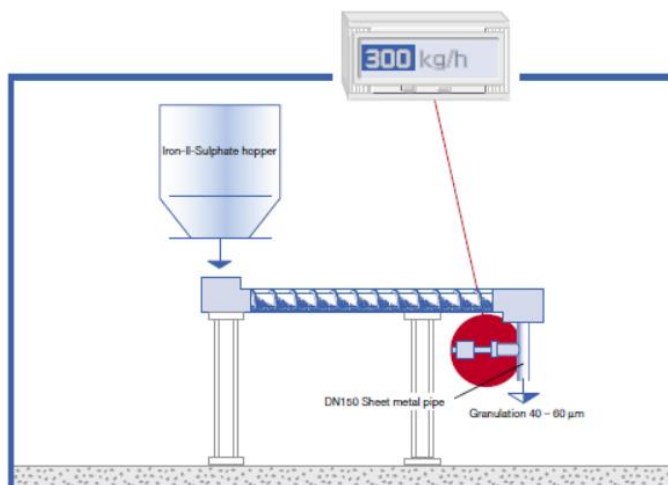
V současné době je velké množství zařízení na měření průtoku kapalin. Ty však u většiny případů nelze aplikovat u sypkých materiálů. Sypké materiály se totiž oproti kapalinám chovají v potrubích či ve žlabech velmi odlišně. Průtokoměrů pro syké hmoty je tedy malé množství.

Druhy přepravy sypkých hmot máme několik. Můžeme materiál dopravovat po dopravníkovém pásu, v otevřeném žlabu prostřednictvím skluzů a třásadlových systémů. Nebo můžeme použít různé potrubní systémy. [2]

7.1. Měření v potrubních systémech:

Podobně jako u žlabů i u potrubní dopravy můžeme využít nárazovou desku. Ta se zde však příliš nehodí. U dopravy potrubím se většinou dopravují jemné nebo prašné materiály a jejich měření průtoku pomocí desky se příliš nehodí. Materiál totiž musí být z trubky vysypáván do „volného prostoru“ a následně násypkou do potrubí zpět sbírán. Navíc mnoho materiálů je chemicky agresivní nebo je jejich prach při určité koncentraci se vzduchem výbušný.

Používá se zde proto měření přímo v potrubí. K tomu jsou zapotřebí průtokoměry sypkých hmot. Ty jsou na rozdíl od vah schopné materiál zachytit nejen při volném pádu tedy vertikálním směru, ale i směru vodorovném. [2]



obr.13. – příklad použití průtokoměru sypkých hmot [2]

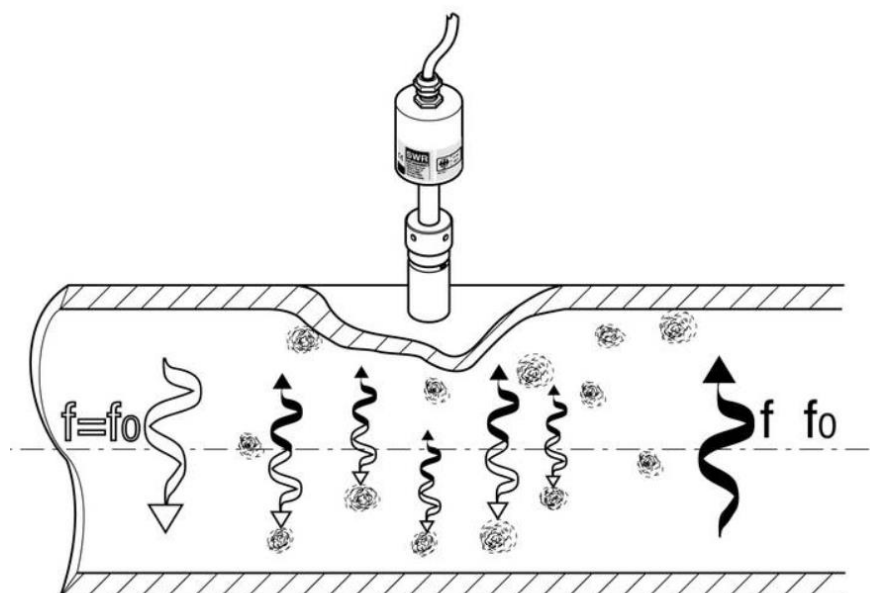
Vlastnosti průtokoměrů sypkých látek:

- Provádění měření bezkontaktně
- Měření používané pro materiály přepravované pneumaticky nebo volně padající
- Otěruvzdornost
- Tento druh měření nepotřebuje vážení materiálu
- Snadná instalace, kalibrace a uvedení do provozu
- Galvanicky oddělné rozhraní RS 485 pro připojení na PLC
- Citlivost měření je možné nastavit
- Dlouhodobá stabilita
- MF senzor připojitelných až do vzdálenosti 1200 m

7.2. Průtokoměr SolidFlow 2.0

Popis zařízení:

SolidFlow je senzor vyvinutý právě přímo pro měření hodnoty průtoku různých sypkých materiálů, jakými jsou jemný i hrubý prach a různé granuláty o velikosti zrna od jednotek nanometrů až po jednotky centimetrů přepravované v kovovém potrubí. Senzor je schopen měřit v režimu volného pádu zkoušeného materiálu. Materiál je zachycen senzory, když je pneumaticky přepravován (tlakovým vzduchem unášený materiál). [2] [3]



obr.14. – princip fungování průtokoměru sypkých hmot [3]

Snímačem vysílaný mikrovlnný paprsek využívá stěny kovového potrubí ke svému šíření a samotné potrubím se tak stává nedílnou součástí měřícího principu. Proto jej lze tento systém použít pouze v kovovém potrubí. Mikrovlnná energie je následně odrážena / rozptylována jednotlivými pevnými částicemi materiálu zpět do přijímače snímače, který ji převádí na elektrické signály (elektrické pulsy), u nichž se následně vyhodnocuje jejich frekvence a amplituda. [2] [3]

7.3. Průtokoměr SWR DensFlow:

Popis zařízení:

Podobně jako průtokoměr SolidFlow, i typ DensFlow byl vyvinut speciálně pro měření průtoku a množství sypkých (pevných) materiálů. Zde však veškerá podobnost končí. Snímač DensFlow je svojí masivnější konstrukcí a rozdílným měřícím principem zaměřený na aplikace s většími průměry potrubí, pro materiál i s hrudkami větší než 1 cm, pro větší průtoky, větší rychlosti pohybu materiálu či větší tlaky v potrubí při dopravě. Masivnější konstrukce i kompaktní provedení, kdy se při montáži nijak nezasahuje do stávajících potrubí, je i více odolné proti vnějším mechanickému poškození. [2] [3]



obr.15. – Průtokoměr SWR DensFlow [3]

Průtokoměr je totiž tvořený kompaktní krátkou speciální měřicí trubicou s přírubami (délka 500 mm), která se vkládá jako další segment do nebo mezi stávající segmenty potrubí. Samotný snímač je tak prakticky mechanicky nerozbitný. To, že trubka je měřicí zařízení pak prozrazuje k ní pevně přimontovaná kovová krabice obsahující elektrické obvody. Ty jednak generují signál pro vysílač a také zesilují a vyhodnocují signál z přijímače. [2] [3]

Protože však magnetické pole i signál přijímače je analogový kontinuální, neexistuje zde z principu funkce informace o tom, zda materiál stojí či se pohybuje a případně jak rychle. Tato informace je zásadní pro výpočet průtoku i sumarizaci prošlého množství. Zde k tomu další dvě stejná čidla na dvou dalších místech vzdálené 8 nebo 16 mm (přepínatelná). [2] [3]

7.4. Průtokoměr MF 3000:

Popis zařízení:

Průtokoměr sypkých látek MF 3000 je vyvinutý pro měření hmotnostního průtoku sypkých anebo granulovaných materiálů, přepravovaných pneumaticky anebo volně padajících v kovových potrubích. [1]



obr.16. – Průtokoměr MF 3000 [1]

Další informace o zařízení:

Poskytuje kontinuální informaci o průtoku a vzhledem na unifikovaný výstupní signál je ho možno zařadit do uzavřené smyčky. Proti váhovému systému měření má výhodu v nižších pořizovacích nákladech a v jednoduché montáži. [1]



obr.17. – Zapojení průtokoměru MF 3000 [1]

7.5. Signalizátor průtoku sypkých hmot 500M

Popis zařízení:

Proces měření tímto signalizátorem sypkých hmot je bezkontaktní. Funguje na principu Dopplerova jevu. Protože je bezkontaktní nepodléhá opotřebení vlivem sledovaného materiálu.

Používá se například u rozpoznávání poruch průtoku při dopravě prášků, pelet, prachu či granulí. Mezi jeho výhody patří schopnost včasného rozpoznávání poruch při průtoku. Tímto způsobem může spolehlivě upozornit na problémy způsobené zablokováním, nedostatkem mat. nebo systémovou poruchou. [1]



obr.18. – Signalizátor průtoku sypkých hmot 500M [1]

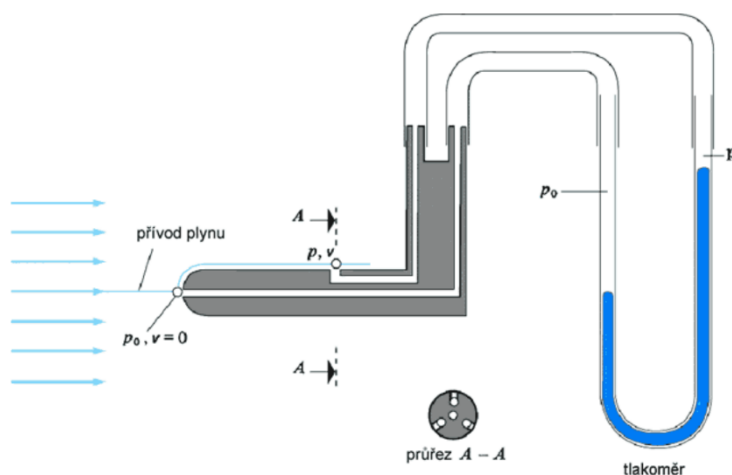
Další vlastnosti zařízení:

- Možnost nastavitelnosti citlivosti
- Provoz zařízení je bezúdržbový
- Snadná montáž
- Schopen signalizace průtoku od několika [g/h] až po [t/h]
- Umístění do potrubí, na dopravníky nebo do sil a podobně.

7.6. Pitotova a Prandtlůva trubice

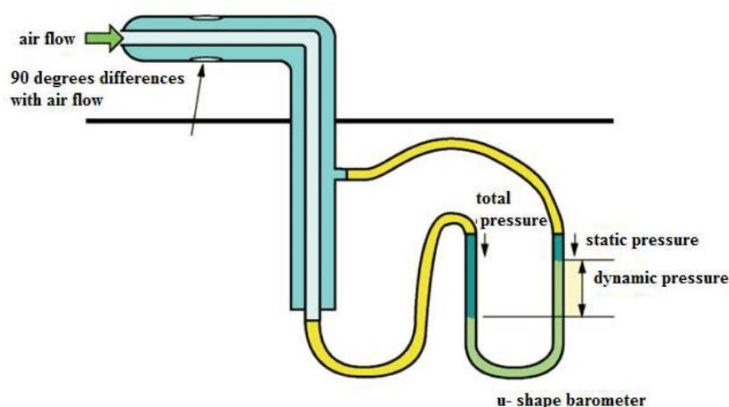
Popis zařízení:

Prandtlůvy trubice se pro měření používají již řadu let. Trubice se používají v kombinaci s diferenčním manometrem. Jedná se o tenkou dvouplášťovou trubku, která je otočená otvorem vnitřní trubky v proti směru proudícího plynu. Tímto otvorem je tak nabíráno rovnoběžné proudění. Druhým otvorem ve vnější stěně trubky je zachycováno proudění ze zdroje. Toto proudění je kolmé na směr proudícího plynu. Prandtlůvy trubice vycházejí z fyzikálního principu, který říká že na vrcholu rotačního paraboloidu je tlak roven nule. Trubice mají tedy většinou protáhly elipsovitý tvar. Avšak díky tvaru se stávají méně skladným měřidlem, proto jsou i ve skládací či teleskopické variantě. [13], [14]



obr.19. – Schéma principu Prandtlůvy trubice [13]

Pitotova trubice je jakousi zjednodušenou verzí Prandtlůvy trubice. Mezi rozdíly patří zejména to, že je jednoplášťová. Jedna trubice je umístěna, pokud možno doprostřed trubky měřené součásti. Na čele této trubky je pak měřen celkový tlak. Druhou trubicí je měřen statický tlak, který je měřen na plášti trubice. [13], [14]



obr.20. – Schéma principu Pitotovy trubice [15]

7.7. Anemometry

Popis zařízení:

Anemometr je zařízení, které měří rychlost a tlak větru. Pro meteorology je nezbytnou pomůckou při sbírání dat pro předpověď počasí. Tato metoda měření je také důležitá pro práci fyziků, kteří studují pohyby větru. Většina typů anemometru má tři nebo čtyřiisky uchycené na horizontálních ramenech.

Ramena jsou pak spojena vertikální tyčí. Pohyb větru se opírá oisky, které se začínají pohybovat a roztáčí tak tyč. Měření pak udává počet otoček za určený čas a tato hodnota se dále dá přepočítat na rychlost větru.

Existují pak ještě typy anemometrů, které mají „tyč“ v horizontální poloze aisky nahrazují lopatky, jaké můžeme vidět u větrných mlýnů.

Síla větru může být také vyjádřena velikostí tlaku. Ke změření tlaku je zapotřebí trubkový anemometr. Měří vzduch tlačící na vnitřek skleněné trubky, která má zaslepenou jednu stranu. Srovnáním naměřeného tlaku uvnitř trubky a mimo trubku získáme naměřenou hodnotu. [14],[16]

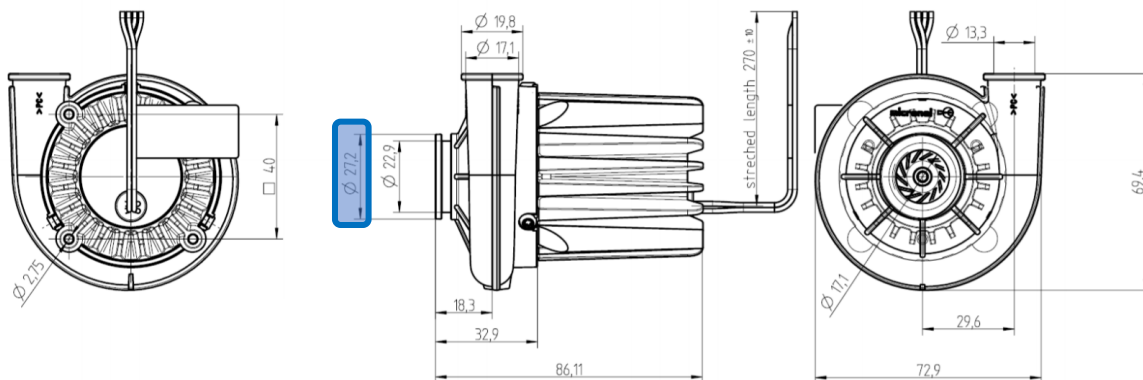


obr.21. – Ilustrační obrázek sestavy anemometru [17]

8. Určení vhodné trubice a další komponenty pro naši pneumickou sestavu:

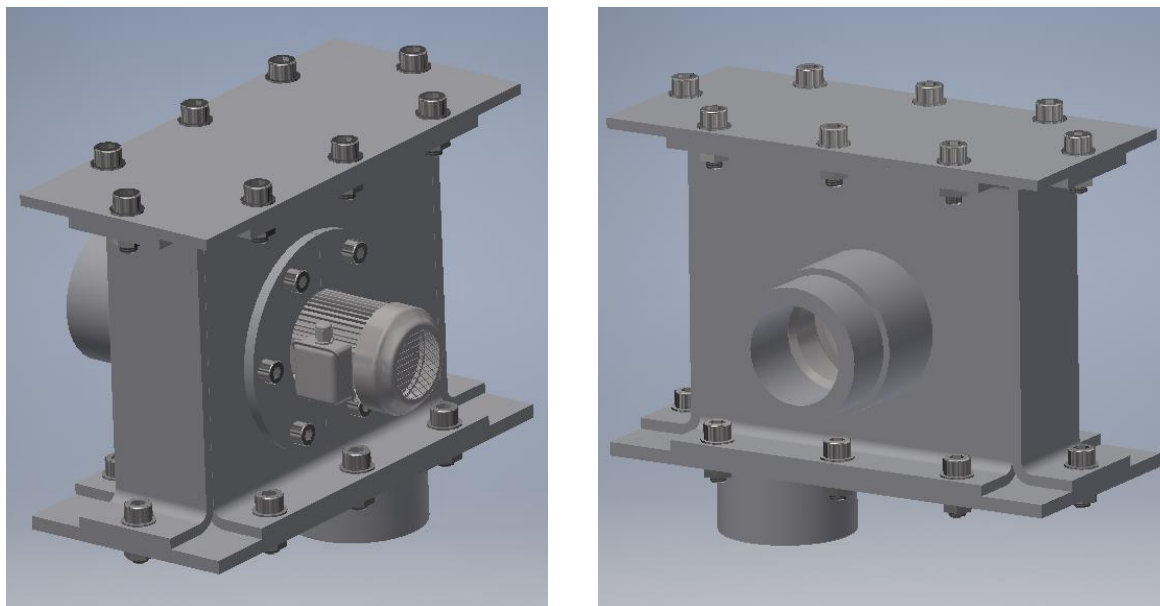
8.1. Volba vhodného potrubí, pro spojení dmyhadla a zásobníku

Volím potrubí za předpokladu, že zvolené turbo bude **U71HL-024KM-4**. To má připojovací rozměr k potrubí 27,2 mm viz obr. 22, maximální tlak může vyvinout 7 400 Pa = 0,074 bar.



obr.22. – Rozměrové schéma zvoleného dmyhadla [10]

Následné vytvoření konstrukčního řešení nástavby dmyhadla na průměr hadice o vnitřním průměru 50 mm.



obr.23. – obrázek konstrukčního řešení [21]



P 7 L P U

Material: Transparent polyester-polyurethane (standard and AS version)
Polyether- polyurethane (AE and PAS version)
Wall thickness: 0.7 mm
Reinforcement: Steel wire helix
Working temp.: From -40°C up to +100°C

Robust, smooth bore hose designed to extract and transport highly abrasive materials. Non-toxic and oil resistant. Widely used in woodworking, metalworking and plastic industry. Other diameters available in the range of 25 + 500 mm.

AE version - resistant to hydrolysis and microbes, compliant with FDA regulations and EU Directives

AS version - antistatic ($R < 10^8 \Omega$) - TRBS 2153.

PAS version - resistant to microbes and hydrolysis, compliant with FDA 21 CFR 177.2600, antistatic ($R < 10^9 \Omega$) according to TRBS 2153, with stainless steel helix.

code	I.D. [mm]	working pressure [bar]	vacuum [bar]	bending radius [mm]	weight [kg/m]	standard length [m]
SC-P7LPU-030	30	1.3	0.4	30	0.25	10
SC-P7LPU-040	40	1.15	0.3	40	0.40	10
SC-P7LPU-050	50	1	0.25	50	0.45	10
SC-P7LPU-060	60	1	0.25	60	0.48	10
SC-P7LPU-065	65	0.9	0.2	65	0.55	10
SC-P7LPU-070	70	0.8	0.2	70	0.60	10
SC-P7LPU-080	80	0.8	0.2	80	0.65	10
SC-P7LPU-090	90	0.6	0.18	90	0.74	10

obr.24. – Hodnoty voleného potrubí [18]

Za těchto podmínek jsem zvolil potrubí **SC-P7LPU-050** o vnitřním průměru 50 mm, který snese maximální pracovní 1 tlak bar. Jeho tloušťka stěny je 0,7mm a má uzemňovací kabel, kvůli riziku vzniku statické elektřiny. Připojovací rozměr potrubí je o malinko větší než připojovací rozměr dmychadla. Větší je z důvodu lepší montáže. Rozdíl průměrů vyřeší přitáhnutí objímky.

8.2. Volba vhodné spony pro spojení hadi



HDC W1, W5

Silná páska s tvarovanými okraji, doporučena pro uchycení silnostěnných, vyztužených průmyslových hadic. Díky šestihlanné hlavě šroubů je možno použít standardní nářadí jako ploché, násadové nebo momentové klíče.

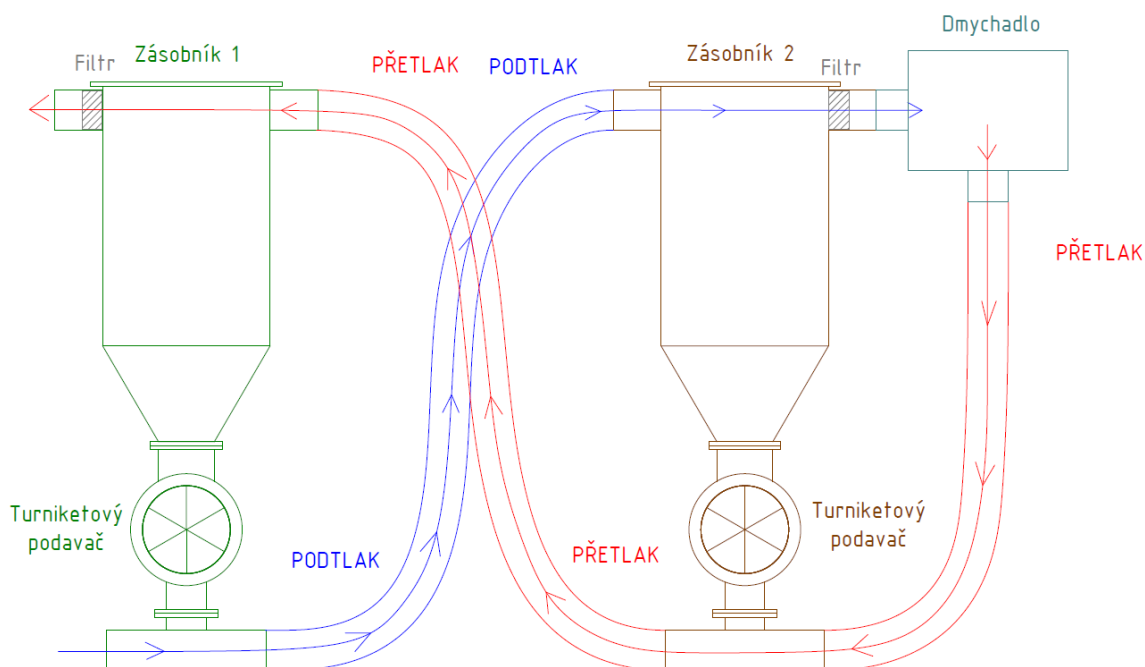
W1 - všechny elementy vyrobeny z galvanizované oceli,
W5 - všechny elementy vyrobeny z nerezí AISI 316.

index W1	index W5	průměr min. / max. [mm]	síla x šířka pásky W1 [mm]	síla x šířka pásky W5 [mm]	rozměr šroubu [mm]
AB-HDC-017-019-W1	AB-HDC-017-019-W5	17 + 19	0,6 × 18	0,6 × 18	M5 × 40
AB-HDC-020-022-W1	AB-HDC-020-022-W5	20 + 22			
AB-HDC-023-025-W1	AB-HDC-023-025-W5	23 + 25			
AB-HDC-026-028-W1	AB-HDC-026-028-W5	26 + 28			
AB-HDC-029-031-W1	AB-HDC-029-031-W5	29 + 31	0,8 × 20	0,6 × 20	M6 × 50
AB-HDC-032-035-W1	AB-HDC-032-035-W5	32 + 35			
AB-HDC-036-039-W1	AB-HDC-036-039-W5	36 + 39			
AB-HDC-040-043-W1	AB-HDC-040-043-W5	40 + 43			
AB-HDC-044-047-W1	AB-HDC-044-047-W5	44 + 47	1,2 × 22	0,8 × 22	M6 × 55
AB-HDC-048-051-W1	AB-HDC-048-051-W5	48 + 51			
AB-HDC-052-055-W1	AB-HDC-052-055-W5	52 + 55			
AB-HDC-056-059-W1	AB-HDC-056-059-W5	56 + 59			

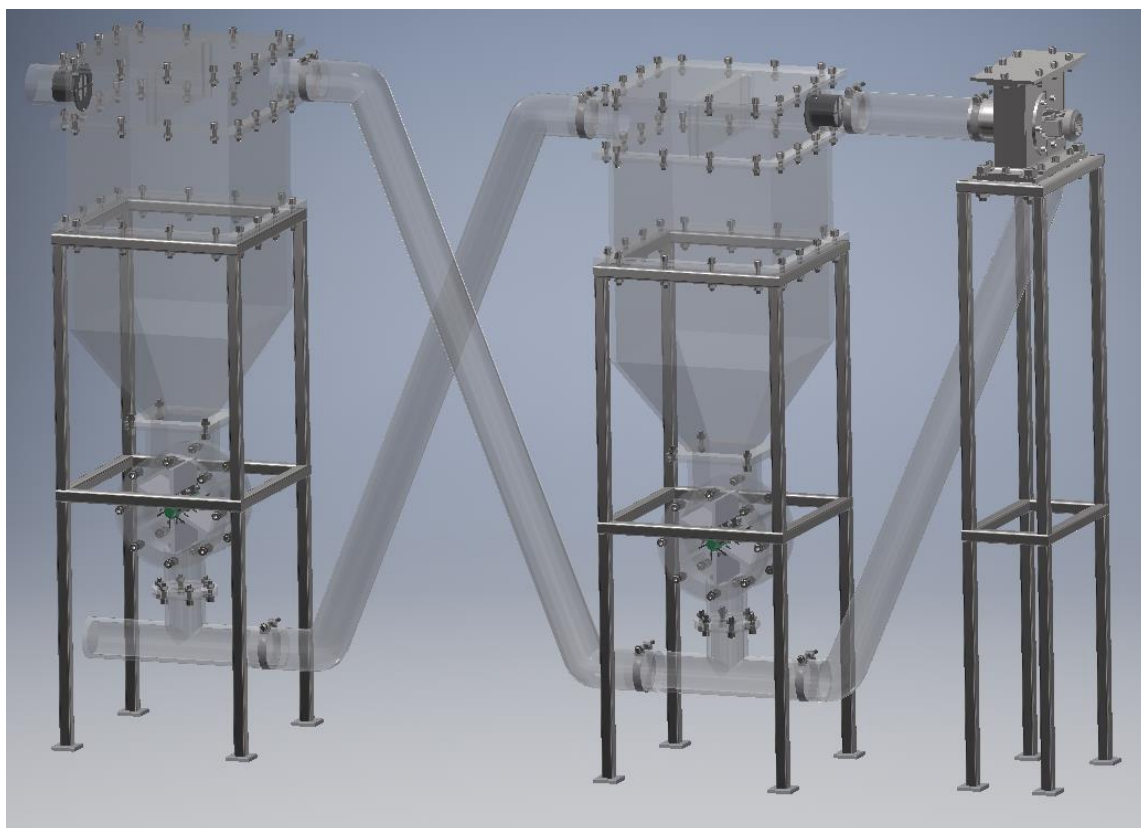
obr.25. – Hodnoty voleného potrubí [22]

Pro správně zvolenou sponu jsem musel brát v potaz dva rozměry. Zajímalo mě rozmezí spony. Od připojovacího rozměru k dmychadlu po vnější rozměr zvolené hadice. Tomuto rozměru odpovídá zvolená spona **AB-HDC-048-051-W5** o průměru 48 ÷ 51 mm.

9. Schéma řešení pneumatické dopravy



obr.26. – Schéma navrhovaného PD [21]



obr.27. – 3D sestava navrhovaného PD [21]

Závěr:

V první části byla zhotovena řešerše pneumatické dopravy a popsání rozdílu mezi podtlakovou dopravou a dopravou přetlakovou.

V analytické části byla vypočtena celková tlaková ztráta, a tedy nejmenší potřebný tlak 6 100 [Pa] a minimální potřebný průtok 471 [l/min]. Podle vypočtených parametrů jsem vyhledal několik dmychadel. Následně jsem zvolil dmychadlo U71HL-024KM-4. Z dmychadel, co jsem bral v úvahu mi přijde nevýhodnější. Je schopné vyvodit ideální tlak a má taky menší pořizovací náklady a rozměry.

V dalším kroku jsem zvolil vhodné pneumatické potrubí, kterým je SC-P7LPU-050. Bylo třeba zvolit také spony, které uchycují potrubí ke konstrukci. Tomuto rozměru odpovídá spona AB-HDC-048-051-W5.

Posledním krokem bylo zhotovení konstrukčního návrhu daného pneumatického dopravníku. Součástí je tedy výkresová dokumentace obsahující: sestavný výkres pneumatického dopravníku a několik dílčích výkresů. Tyto výkresy jsem zhotovil v programu Autodesk Inventor 2017.

Zdroje informací:

- [1] Prutokomer-mf-3000. *Www.dex.cz* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.dex.cz/produkt/prutokomer-mf-3000/>
- [2] Měření průtoku sypkých materiálů. *Automatizace.hw.cz* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-prutoku-sypkych-materialu>
- [3] SolidFlow 2.0 - Throughput measuring. *Www.swr-engineering.com* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.swr-engineering.com/en/measurement-products/throughput-measuring-dry-bulk-solids-measuring-flow-metering.html>
- [4] Pneumatická doprava. *Www.sklenar-technologie.cz* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <https://www.sklenar-technologie.cz/cs/m-53-pneumaticka-doprava>
- [5] Pneumatická doprava. *Www.rayman.cz* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <http://www.rayman.cz/index.php?a=stranka&m=9&s=43>
- [6] Pneumatické dopravníky: eknihovna. *Www.is.mendelu.cz* [online]. [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=4960
- [7] Pneumatická potrubní doprava. *Www.tzb-info.cz* [online]. [cit. 2019-08-10]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/8844-pneumaticka-potrubni-doprava-tuhych-komunalnich-odpadu>
- [8] SOUKUP, J. Nové způsoby odstraňování odpadů (pneumatická doprava). Praha: Výzkumný ústav výstavby a architektury. 1990. 134 s. ISBN 59-184-90.
- [9] Dopravní a manipulační zařízení II [online]. VŠB, 2003 [cit. 2019-08-11]. Dostupné z: http://www.342.vsb.cz/pol25/Polak_DaMZ_2_NP.pdf
- [10] Ventilátory a dmychadla: Radiální dmychadlo U. *Www.mbmtechnik.cz* [online]. [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: http://www.mbmtechnik.cz/client/7_mbmtechnik/uploads/data/PRODUKTY/Ventilatory%20a%20dmychadla/Radialni%20dmychadla%2C%20rada%20U/U71/U71HL-024KM-4_with_integrated_electronics_01.pdf
- [11] Ventilátory a dmychadla: Radiální dmychadlo U. *Www.mbmtechnik.cz* [online]. [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: http://www.mbmtechnik.cz/client/7_mbmtechnik/uploads/data/PRODUKTY/Ventilatory%20a%20dmychadla/Radialni%20dmychadla%2C%20rada%20U/U100/U100HL_datasheet.pdf
- [12] Air blower: *www.directindustry.com* [online]. [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: [13] <https://pdf.directindustry.com/pdf/elmo-rietschle/catalog-module-f-series/28404-163661.html#open>
- [13] Příklady měřících metod průtoku. *Www.prutoky.cz* [online]. [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: <http://www.prutoky.cz/kapaliny/teorie/priklady-mericich-metod/#kpm-ppt>

- [14] MGR. KYSELOVÁ, Sylva. Mechanika plynů. Www.ssto-havirov.cz [online]. [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: <http://www.ssto-havirov.cz/katalog-obrazku/clanek-289/7637-46-p6-vm26-t26-2.pdf>
- [15] The quality of connecting Pitot tube. Www.researchgate.net [online]. [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/the-quality-of-connecting-Pitot-tube-to-u-shape-barometer-and-the-quality-of-establishing_fig3_309764065
- [16] Anemometer. Www.nationalgeographic.org [online]. [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/anemometer/>
- [17] Kombo sada průtoku vzduchu. Cz.farnell.com [online]. [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: https://cz.farnell.com/testo/0563-4407/air-flow-combo-kit-2-with-bt/dp/2946400?gclid=Cj0KCQjwz8bsBRC6ARIsAEyNnvr1jBqjOcs8QO0cVY-f_od5RIptlgsUtYOdhEwfa7rtlN-RpV8Ce0MaAtSHEALw_wcB&gross_price=true&mckv=p4BM6eXA_dc|pcrid|203336298612|&CMP=KNC-GCZ-GEN-SHOPPING-ALL_PRODUCTS
- [18] Industrial Hoses: Ducting Hoses and Ventilation Hoses. Www.tubes-international.pl [online]. [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: https://www.tubes-international.pl/wp-content/uploads/catalogue-en-pdf/hoses_compensators/ducting_hoses_resistant_to_abrasion.pdf
- [19] Vávra, A.: Pneumatická doprava dřevěného odpadu, kapitola 4.4 v knize Hejma, J., Budinský, K., Vávra, A., Drkal, F.: Vzduchotechnika v dřevu zpracovávajícím průmyslu, SNTL, Praha, 1981
- [20] Dzadzio, A., M.: Pnevmatičeskij transport na zernopererabatyvajuščich predprijatijach, Moskva, Zagotizdat, 1961
- [21] Vlastní tvorba
- [22] Hadice a spojky pro průmysl: hadicové spony, www.tubes-international.pl [online]. [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: <https://www.tubes-international.cz/wp-content/uploads/katalog-pdf-cz/prumyslove-armatury/spony-na-koncovky-a-hadice.pdf>
- [23] Mikulčák a kolektiv. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: SPN Praha, 1988

Seznam příloh:

Výkresy:

SESTAVNÝ VÝKRES PD

A2 D_PD_01

SESTAVNÝ VÝKRES ZÁSOBNÍKU

A3 D_PD_01_01

SESTAVNÝ VÝKRES TURNIKETU

A3 D_PD_01_03

VÝROBNÍ VÝKRES STRED TURNIKETU

A3 D_PD_01_03_01

VÝROBNÍ VÝKRES HRIDEL TURNIKETU

A4 D_PD_01_03_02

Další přílohy:

Kompaktní disk

Zpráva – formát PDF

Výkresy – formát PDF